



Analisa karbon aktif monolit berbahan asal ampas jus wortel untuk aplikasi elektroda superkapasitor

Analysis of Activated Carbon Monolith Derived from Carrot Juice Waste for Supercapacitor Electrode Application

Received 23 Oktober 2020
Accepted 27 November 2020
Published April 2021

Dewi Ramayani, Yanuar Hamzah*, Erman Taer, Novi Yanti dan Apriwandi

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Riau

Abstrak. Pengembangan sistem penyimpanan energi elektrokimia yang efektif dan efisien menjadi sangat penting pada era evolusi teknologi dan industri modern saat ini. Penelitian ini mengemukakan karbon aktif sebagai bahan dasar material elektroda untuk diaplikasikan pada piranti penyimpan energi, khususnya superkapasitor melalui analisa densitas, X-ray diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared (FTIR) dan Cyclic Voltammetry (CV). Karbon aktif berbentuk monolit disiapkan dari ampas jus wortel melalui pendekatan pirolisis satu tahap terintegrasi dan aktivasi kimia KOH. Proses pirolisis satu tahap terintegrasi dilakukan melalui penggabungan karbonisasi dan aktivasi fisika dalam atmosfer gas N_2/CO_2 . Berdasarkan analisis data, karbon aktif menunjukkan sifat amorf yang normal dan sifat porositas terkonfirmasi. Lebih lanjut, sifat elektrokimia dievaluasi menggunakan metode Cyclic Voltammetry (CV) pada sistem dua elektroda. Kapasitansi spesifik yang dihasilkan sebesar 155 F/g dalam elektrolit 1 M H_2SO_4 dengan energi spesifik dan daya spesifik adalah 21,52 Wh/kg dan 77,57 W/kg. Berdasarkan analisa ini maka ampas jus wortel terkonfirmasi berpotensi sebagai karbon aktif untuk elektroda yang diaplikasikan dalam piranti penyimpan energi superkapasitor.

Abstract. The development of an effective and efficient electrochemical energy storage system is very important in today's era of technological evolution and the modern industry. This research suggests that activated carbon is the raw material for electrode materials to be applied to energy storage devices, especially supercapacitors through density analysis, X-ray diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared (FTIR), and Cyclic Voltammetry (CV). Activated carbon in the monolith form derived from carrot juice waste was prepared through a one-stage integrated pyrolysis approach and chemical activation of KOH. An integrated one-stage pyrolysis process was carried out by combining carbonization and physical activation in an N_2/CO_2 gas atmosphere. Based on data analysis, activated carbon performed normal amorphous behavior with confirmed porosity features. Furthermore, the electrochemical properties were evaluated using the Cyclic Voltammetry (CV) method at the two-electrode system. The specific capacitance was found as high as 155 F/g in the 1 M H_2SO_4 aqueous electrolyte with specific energy and specific power as high as 21.52 Wh/kg and 77.57 W/kg, respectively. Based on this analysis, the carrot juice waste has been confirmed to have the potential as activated carbon for the electrodes applied in supercapacitor energy storage technology.

Keywords: Carrot Juice Waste, Activated Carbon, Electrode Materials, Supercapacitor

Pendahuluan

Peningkatan penggunaan energi dan evolusi teknologi yang semakin pesat sangat berdampak pada cadangan energi dunia, polusi udara dan dampak lingkungan lainnya secara menyeluruh. Penggunaan energi yang berkelanjutan dan berlebihan tentunya berdampak pada ketersediaan bahan bakar fosil yang semakin menipis serta dampak iklim global yang ditimbulkan. Hal ini mendorong penelitian untuk mengembangkan sistem energi alternatif terbarukan dan pengembangan penyimpanan energi dan sistem konversi yang efektif dan efisien. Kebutuhan untuk pengembangan sistem penyimpanan energi yang efisien sangat penting, terutama ketika kebutuhan energi meningkat serta biaya pemenuhan energi yang relatif mahal. Baru-baru ini, superkapasitor telah menunjukkan kinerja yang luarbiasa sebagai sistem penyimpanan energi karena kecepatan pengisian dan pengosongan yang relatif cepat, kepadatan daya tinggi, stabilitas jangka panjang tanpa batas, biaya preparasi rendah, dan proses produksi relatif lebih mudah (Pandolfo

and Hollenkamp, 2006). Superkapasitor tipe lapisan ganda listrik elektrokimia (EDLC) dianggap sebagai tipe yang ideal untuk sistem penyimpanan elektrokimia dikarenakan material dasar yang ramah lingkungan, sifat konduktifitas tinggi dan siklus hidup yang sangat tinggi (González-García, 2018). Namun demikian, superkapasitor tipe ini masih memiliki energi spesifik yang relatif rendah dan tidak seimbang dengan energi spesifik yang tinggi. Para peneliti melakukan riset yang intens untuk meningkatkan energi superkapasitor dengan berbagai cara, seperti mengembangkan dan memodifikasi material baru dengan kinerja kapasitif yang luarbiasa.

Karbon aktif dari limbah biomassa adalah salah satu material baru yang sangat menjanjikan sebagai material dasar superkapasitor kinerja tinggi karena menyediakan luas permukaan tinggi, ukuran distribusi pori yang bervariasi, struktur pori yang unik dan dalam skala nano, stabilitas kimia yang baik, dan proses konversi yang relatif lebih mudah (Mensah-Darkwa et al., 2019; Rangabhashiyam. S and Balasubramanian. P, 2019).

Beberapa biomassa yang dilaporkan berpotensi sebagai bahan dasar karbon aktif antara lain kulit durian (Ong et al., 2012), bunga sakura (Ma et al., 2019), kulit nangka (Foo and Hameed, 2012), kotoran sapi (Bhattacharjya and Yu, 2014), limbah kayu karet (Taer et al., 2018a), dan kulit manggis (V. Yang et al., 2019), dll. Mereka melaporkan bahwa biomassa-biomassa tersebut sangat berpotensi sebagai material karbon aktif untuk diterapkan pada elektroda superkapasitor. Namun demikian, studi-studi ini masih membutuhkan metode yang kompleks dan memerlukan penambahan material lain yang dapat mengganggu sifat konduktifitas alami dari bahan dasar. Lebih lanjut, pemanfaatan limbah wortel telah dilaporkan sebelumnya sebagai karbon aktif untuk superkapasitor melalui proses aktivasi kimia menggunakan ZnCl_2 . Mereka mendapatkan kapasitansi spesifik sebesar 135.5 F/g (Ahmed et al., 2018). Namun demikian penelitian ini masih menggunakan bahan perekat dalam preparasi tes elektrokimia. Hal ini tentunya dapat mengganggu sifat konduktifitas alami dari bahan dasar.

Pada penelitian ini, karbon aktif disiapkan dari ampas jus wortel melalui metode yang sederhana dan ramah lingkungan serta tanpa penambahan material sintetik untuk diterapkan sebagai elektroda superkapasitor. Sampel ampas jus wortel murni dipirolisis dan diaktivasi secara kimia. Proses pirolisis dilakukan secara satu tahap terintegrasi meliputi karbonisasi dan aktivasi fisika dalam lingkungan gas N_2/CO_2 . Aktivasi fisika menggunakan larutan KOH 0,3 m/L. Berdasarkan analisa *X-ray Diffraction* (XRD) karbon aktif menunjukkan sifat amorf yang baik dengan struktur porositas yang relatif tinggi. Lebih lanjut, karbon aktif monolit yang dibuat dari ampas jus wortel menunjukkan kinerja elektrokimia yang unggul, dengan kapasitansi spesifik, energi spesifik dan daya spesifik tinggi masing-masing adalah sebesar 155 F/g, 21,52 Wh/kg dan 77,57 W/kg.

Metodologi

Preparasi karbon aktif monolit

Karbon aktif berbasis limbah jus wortel disiapkan menggunakan metode yang sederhana dan ramah lingkungan. Ampas jus wortel dikumpulkan dan dibersihkan secara menyeluruh menggunakan air bersih. Selanjutnya, sampel dikeringkan melalui sinar matahari selama 2 hari dan diikuti dengan pengeringan pada oven pengering dalam suhu 110°C selama 2 hari. Proses pengeringan awal dilakukan secara periodik hingga susut massa pada sampel $<6.0\%$. Sampel yang sudah kering dipra-karbonisasi menggunakan oven vakum dengan suhu 250°C dan selanjutnya sampel diubah menjadi bentuk serbuk melalui proses penggilingan dan penyakan. Larutan KOH 0,3 m/L digunakan sebagai bahan pengaktif kimia. Sampel serbuk terprakarbonisasi dicampur dengan larutan KOH pada alat *hotplate* sebagai proses aktivasi kimia. Kemudian, sampel dikonversi menjadi bentuk monolit atau koin dengan menggunakan hidrolik press.

Lebih lanjut, proses pirolisis meliputi karbonisasi dan aktivasi fisika melalui satu tahap terintegrasi pada tabung furnace. Karbonisasi diawali pada suhu kamar hingga suhu 600°C dengan mengalirkan gas N_2 , selanjutnya secara kontinu suhu terus dinaikkan dari 600°C hingga 900°C dan lingkungan gas N_2 diganti menjadi gas CO_2 yang mana proses ini dinamakan proses aktivasi fisika. Akhirnya, karbon aktif yang didapatkan direndam dalam air suling sebagai proses penetralan.

Karakterisasi Elektroda karbon aktif

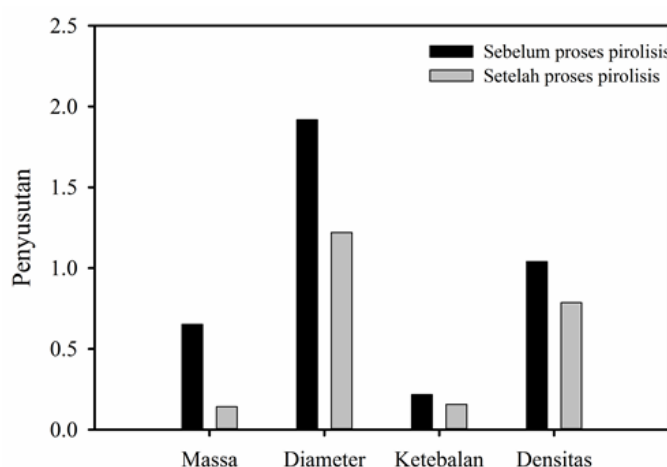
Elektroda karbon aktif ampas jus wortel dievaluasi dan dikarakterisasi melalui sifat fisis dan sifat elektrokimia. Karakterisasi sifat fisis melalui evaluasi densitas, karakterisasi *Fourier Transform Infra-Red* (FTIR), dan *X-ray diffraction* (XRD). Evaluasi densitas dilakukan berdasarkan pengukuran dimensi monolit dari karbon aktif meliputi massa, ketebalan dan diameter. Lebih lanjut, karakterisasi *Fourier Transform Infra-Red* (FTIR) dilakukan untuk mengetahui gugus fungsi dan struktur rantai karbon menggunakan instrumen Shimadzu, IR Prestige-21. Selain itu, karakterisasi *X-ray diffraction* (XRD) dievaluasi menggunakan instrumen Shimadzu 7000 pada rentang sudut $2\theta=10-60^\circ$ dengan $\text{Cu K}\alpha$ sebagai sumber radiasi. Sifat elektrokimia elektroda superkapasitor dievaluasi menggunakan metode *Cyclic Voltammetry* (CV) melalui instrumen CV, UR Rad-Er 5841. Sebanyak dua karbon aktif monolit dipoles pada ketebalan 0,2 mm sebagai elektroda ditempatkan pada badan sel yang terbuat dari akrilik. Selanjutnya, membran telur itik digunakan sebagai pemisah dua elektroda. 1 M H_2SO_4 dipilih sebagai elektrolit dan sebagai perbandingan juga digunakan elektrolit netral. Kapasitansi spesifik, rapat energi dan rapat daya pada elektroda superkapasitor dihitung menggunakan persamaan standar.

Hasil Penelitian

Analisa Densitas

Data hasil perhitungan densitas elektroda karbon sebelum dan setelah dilakukan proses pirolisis disajikan dalam bentuk grafik dan tabel. Pada proses pirolisis terintegrasi satu tahap ini, sampel yang sudah berbentuk monolit dikarbonisasi menggunakan gas N_2 dari suhu 30°C sampai 600°C dilanjutkan dengan aktivasi fisika menggunakan gas CO_2 hingga suhu 900°C yang bertujuan untuk menghilangkan sebagian besar bahan dasar yang mudah menguap seperti selulosa dan hemiselulosa (Poonam et al., 2019). Proses pirolisis berpengaruh mengubah bahan baku ampas wortel yang sudah diaktivasi kimia menggunakan zat pengaktif KOH 0,3 m/L menjadi karbon aktif berpori sehingga menyebabkan pengurangan dimensi monolitik sampel. Data perhitungan densitas didapatkan dari pengukuran massa, diameter, dan ketebalan. Grafik penyusutan hasil pengukuran massa, diameter, dan ketebalan sampel saat sebelum dan sesudah pirolisis dapat dilihat pada Gambar 1

Gambar 1 memperlihatkan terjadinya penyusutan massa, diameter, dan ketebalan dari sampel pada sebelum dan setelah dilakukan proses pirolisis. Data hasil pengukuran ini digunakan untuk menghitung nilai densitas melalui persamaan standar. Berdasarkan Gambar 1 dapat dilihat besar penyusutan densitas saat sebelum dan setelah dilakukan pirolisis dengan besar persentase penyusutannya. Penyusutan ini mengindikasikan pembentukan pori dipermukaan elektroda seiring dengan penambahan suhu. Penambahan suhu menyebabkan perkembangan struktur pori membentuk kombinasi pori mikro dan pori meso. Besarnya ukuran struktur pori mempengaruhi luas permukaan dari elektroda karbon, dimana semakin besar ukuran pori yang ada akan menghasilkan luas permukaan yang kecil (Deng et al., 2016).

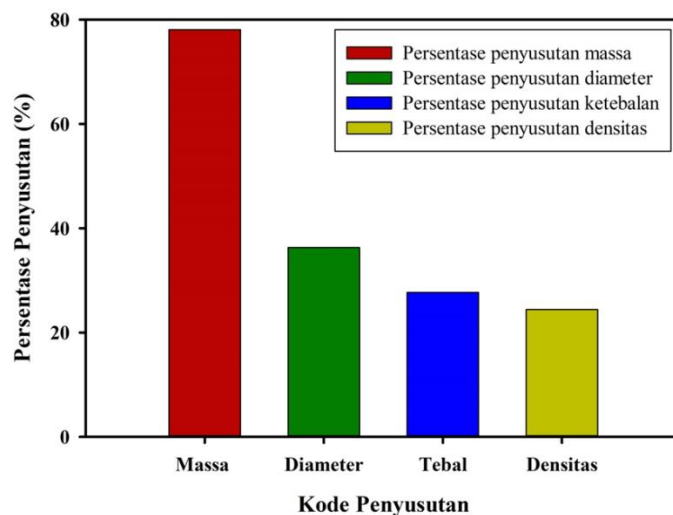


Gambar 1 Grafik penyusutan massa rata-rata, diameter rata-rata, ketebalan rata-rata dan densitas

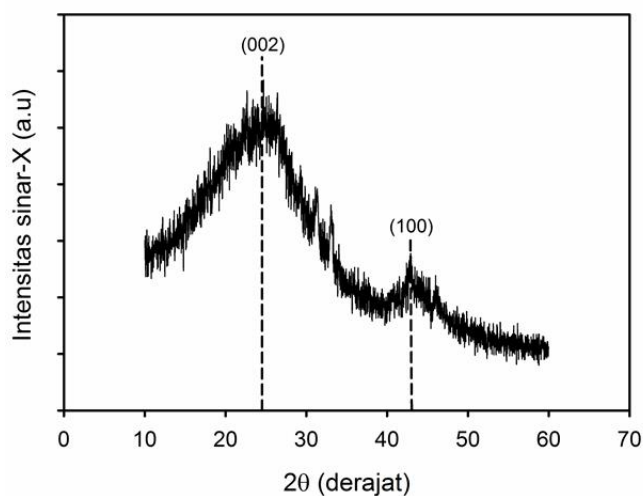
Berdasarkan data hasil perhitungan grafik penurunan massa, diameter, dan ketebalan elektroda dapat diketahui besar persentase rata-rata penurunannya densitas juga dapat diketahui. Gambar 2 memperlihatkan grafik persentase penyusutan massa, diameter, ketebalan dan densitas elektroda saat sebelum dan setelah proses pirolisis. Penyusutan ini terjadi karena peningkatan suhu aktivasi fisika yang menyebabkan pengikisan dinding pori mikro dan mengembangkan pori mikro menjadi ukuran yang lebih besar seperti mesopori dan makropori (Zhang et al., 2017) sehingga menyebabkan penurunan massa. Suhu aktivasi fisika yang meningkat dapat meningkatkan penurunan massa, penurunan massa mengindikasikan penurunan densitas elektroda, karena densitas berbanding lurus dengan massa sesuai dengan persamaan standar. Hasil penelitian ini serupa dengan penelitian sebelumnya dengan biomassa berbeda seperti dari daun akasia (Taer et al., 2020), dan kulit durian (Taer et al., 2018b).

Nilai densitas tidak selalu memberikan pengaruh yang besar terhadap nilai kapasitansi spesifik, tetapi harus didukung oleh pengkarakterisasian lainnya seperti XRD dan FTIR. Hal pendukung lainnya yaitu pengaruh struktur

dan kombinasi ukuran pori yang terbentuk sangat mempengaruhi nilai kapasitansi spesifik yang dihasilkan dari elektroda serat sabut kelapa. Perpaduan antara mikropori dan mesopori yang optimum pada permukaan elektroda dapat menaikkan luas permukaan spesifik elektroda karbon.



Gambar 2 Grafik persentase penyusutan massa rata-rata, diameter rata-rata, ketebalan rata-rata, dan densitas rata-rata



Gambar 3 Kurva XRD karbon aktif ampas wortel

Analisa X-ray diffraction (XRD)

Sifat mikrokristalin karbon aktif dari ampas wortel dapat dievaluasi menggunakan metode X-ray diffraction (XRD). Karbon aktif ampas wortel dikarakterisasi menggunakan XRD pada rentang sudut $2\theta=10^\circ$ hingga 60° dengan $\text{Cu K}\alpha$ sebagai sumber radiasi. Gambar 3 menunjukkan kurva XRD dari karbon aktif ampas wortel yang menampilkan bahwa ada dua puncak landai yang kuat pada sudut $2\theta=24^\circ$ dan $2\theta=43^\circ$ yang berkorelasi dengan bidang refleksi 002 dan 100 (Wei et al., 2019; Xia et al., 2012). Nilai ini hampir sama dengan yang telah dilaporkan sebelumnya dengan pemanfaatan limbah wortel sebagai adsorben dan karbon aktif dalam bentuk serbuk (Ahmed et al., 2018; Changmai et al., 2018). Hal ini menandakan bahwa sampel karbon ampas wortel yang dikarakterisasi memiliki sifat

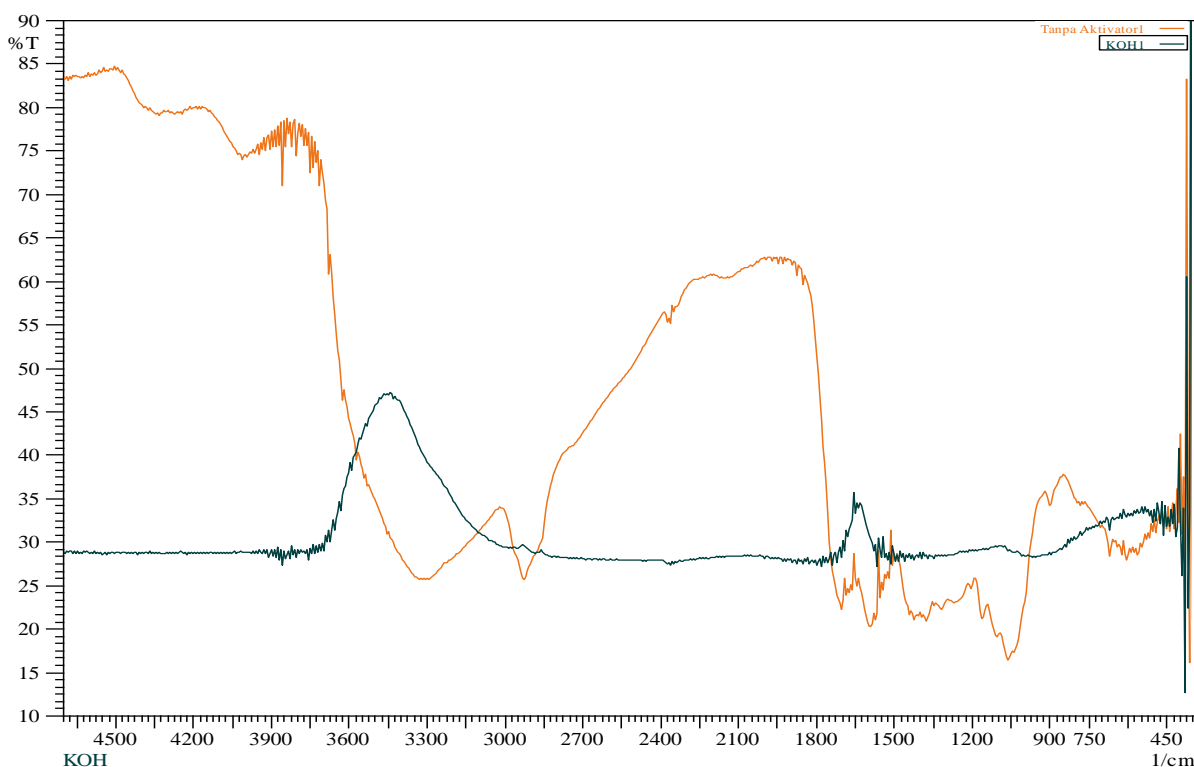
amorf yang baik. Sifat ini sangat diperlukan dalam meningkatkan kinerja elektroda superkapasitor. Lebih lanjut, jarak antar bidang (d_{002} dan d_{100}) dan dimensi mikrokristalin (L_c dan L_a) juga dievaluasi.

Data XRD dapat digunakan untuk mengetahui jarak antar bidang dan dimensi mikrokristalin dari karbon aktif ampas sagu. Parameter-parameter ini didapatkan dari proses pendekatan atau fitting dari data XRD dengan menggunakan *software* Origin. Berdasarkan proses fitting dan pendekatan dengan persamaan lorentzian, telah didapatkan jarak antar bidang d_{002} dan d_{100} adalah 3.098 Å dan 1.998 Å. Nilai-nilai ini dianggap normal untuk karbon amorf sebagaimana juga dinyatakan pada studi-studi sebelumnya. Selain itu, dimensi mikrokristalin L_c dan L_a memiliki nilai sebesar 11.378 Å dan 17.781 Å. Beberapa penelitian menyebutkan bahwa nilai L_c berkaitan dengan luas permukaan sampel karbon aktif, melalui persamaan empiris yaitu $SSA = 2/\rho_{xrd}L_c$, dimana $\rho_{xrd} = (d_{002}(\text{grafit})/d_{002}(\text{sampel})) \rho_{\text{grafit}}$. Nilai $d_{002}(\text{grafit})$ dan ρ_{grafit} adalah 0,33354 nm dan 2,268 gr/cm³ (Deraman et al., 2015; Kumar et al., 1997). Berdasarkan persamaan ini maka diketahui bahwa luas permukaan sampel adalah sebesar 1214.23 m²/gr. Nilai luas permukaan ini lebih besar dibandingkan dengan yang dilaporkan oleh Ahmed et al, (2018) dengan menggunakan bahan asal yang sama ampas wortel yaitu 1154 m²/gr untuk diaplikasikan pada superkapasitor (Ahmed et al., 2018).

Analisa Fourier Transform Infra-Red (FTIR)

Fourier Transform Infra-Red (FTIR) adalah metode yang digunakan untuk menentukan gugus fungsi dan struktur rantai karbon yang terkandung dalam material karbon

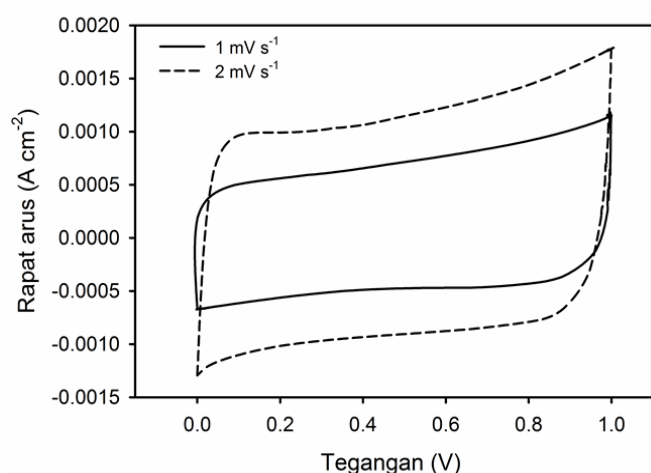
aktif. Struktur rantai karbon yang dihasilkan oleh karbon aktif dari ampas wortel dievaluasi pada kisaran bilangan gelombang 450–4500 cm⁻¹ seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Spektrum FTIR menunjukkan karbon aktif ampas wortel dan sebagai perbandingan juga ditampilkan serbuk ampas wortel yang telah pra-karbonisasi. Spektrum serbuk ampas wortel terpra-karbonisasi menunjukkan adanya puncak serapan yang luas dan intens pada 3315,78 cm⁻¹ menunjukkan adanya gugus hidroksil (O–H) yang terserap dalam sampel. Puncak yang diamati pada 2919,39 cm⁻¹ dapat dikaitkan dengan getaran peregangan C–H jenuh alifatik dari polisakarida lignin termasuk selulosa dan hemiselulosa (Song et al., 2013). Selanjutnya bilangan gelombang 1718,65–1589,41 cm⁻¹ menunjukkan adanya regangan karbonil, dan bilangan gelombang 1054,14 cm⁻¹ menunjukkan adanya regangan eter. Setelah serbuk ampas wortel diaktivasi kimia dan dipirolisis melalui karbonisasi dan aktivasi fisika, spektrum FTIR karbon aktif sangat berbeda dari serbuk terprakarboisasi. Pita lebar yang terletak di rentang bilangan gelombang 300–3500 cm⁻¹ menunjukkan regangan O–H, akan tetapi bergeser ke bilangan gelombang yang lebih tinggi. Hal ini dikarenakan adanya penguapan kandungan air (Erabee et al., 2017). Pita lebar pada 1411,95 cm⁻¹ mengindikasikan adanya getaran C–C pada cincin aromatik. Lebih lanjut, Pada rentang bilangan gelombang 792,78–847,75 cm⁻¹ menunjukkan adanya gugus fungsi fenol (C–O). Banyaknya pita serapan menghilang pada spektrum FTIR untuk karbon aktif yang telah teraktivasi dibandingkan dengan serbuk ampas wortel terprakarboisasi dikarenakan adanya penguapan bahan organik pada suhu tinggi (Changmai et al., 2018).



Gambar 4 Spektrum FTIR serbuk karbon terprakarboisasi dan teraktivasi KOH dari ampas wortel

Analisa Sifat Elektrokimia

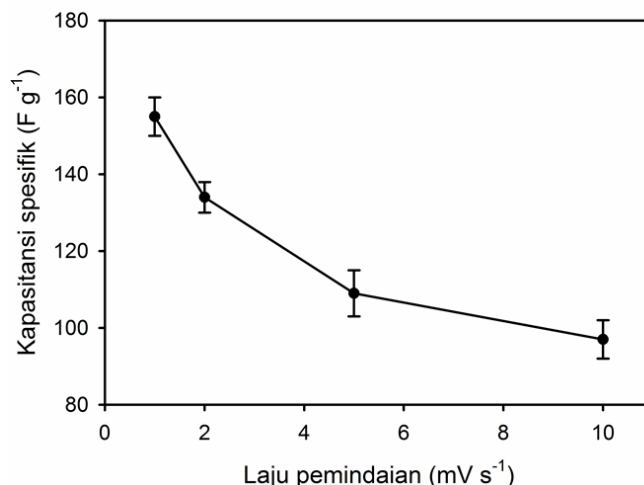
Sifat elektrokimia ekektroda superkapasitor dari karbon aktif berbahan asal ampas wortel dievaluasi menggunakan metode *cyclic voltammetry* (CV) pada sistem dua elektroda. Elektroda superkapasitor disiapkan dalam bentuk koin yang terdiri dua elektroda karbon aktif monolit dengan ketebalan 0.2 mm, separator dari membran kulit telur itik, dan elektrolit 1 M H_2SO_4 . Gambar 5 menunjukkan kurva CV untuk karbon aktif ampas wortel. Kurva CV menampilkan bentuk persegiempat yang terdistorsi yang menandakan bahwa superkapasitor memiliki sifat EDLC yang normal (Abioye and Ani, 2015; Scott, 2016). Lebih lanjut, penggunaan laju pemindaian lebih tinggi dari 1 mV/s hingga 2 mV/s masih mempertahankan bentuk persegiempat. Hal ini mengkonfirmasi bahwa superkapasitor yang dihasilkan memiliki sifat EDLC yang relatif baik. Berdasarkan data CV, kapasitansi dapat dihitung dengan persamaan standar dan dalam penelitian ini telah didapatkan kapasitansi spesifik sebesar 155 F/g pada laju pemindaian rendah 1 mV/s dalam jendela tegangan 0-1,0 V. Nilai kapasitansi spesifik yang didapatkan pada penelitian ini lebih tinggi dengan penelitian sebelumnya dengan bahan dasar biomassa yang sama yaitu ampas wortel dengan kapasitansi spesifik sebesar 135.5 F/g (Ahmed et al., 2018). Hal ini disebabkan karena pada penelitian ini tidak menggunakan bahan perekat dalam pengujian elektrokimia. Selain itu juga, penerepan proses pirolisis satu tahap terintegrasi secara signifikan mempengaruhi kinerja elektroda yang dihasilkan. Proses-proses inilah yang meningkatkan kinerja superkapasitor. Lebih lanjut, hasil ini berkesesuaian dengan penelitian lainna dengan bahan dasar biomassa yang berbeda seperti daun nanas (Agustino et al., 2020). Lebih lanjut, energi spesifik dan daya spesifik yang dihasilkan masing-masing adalah sebesar 21,52 Wh/kg dan 77,57 W/kg.



Gambar 5 Kurva CV elektroda karbon aktif

Gambar 6 menunjukkan grafik kapasitansi spesifik terhadap laju pemindaian pada rentang 1 mV/s, 2 mV/s, 5 mV/s dan 10 mV/s untuk elektroda superkapasitor berbahan asal ampas wortel. Meningkatnya laju

pemindaian menyebabkan kapasitansi spesifik tereduksi secara bertahap. Penurunan kapasitansi spesifik ini dipengaruhi oleh berbagai faktor termasuk distribusi ukuran pori, kombinasi mikro dan mesopori, dan luas permukaan spesifik (S. Yang et al., 2019; Zhang et al., 2018). Namun demikian karbon aktif ampas wortel masi mempertahankan kapasitansi spesifik dengan penurunan hanya ~75.45% pada kecepatan pindai 10 mV/s dengan standar deviasi rata-rata sebesar 4.



Gambar 6 Grafik kapasitansi spesifik terhadap variasi laju pemindaian

Kesimpulan

Karbon aktif berbentuk monolit dari ampas jus wortel telah berhasil disiapkan melalui aktivasi kimia KOH dan proses pirolisis satu tahap terintegrasi meliputi karbonisasi dan aktivasi fisika. Densitas karbon monolit menunjukkan reduksi yang cukup besar yang mengindikasikan pembentukan sifat porositas yang baik. Lebih lanjut, kurva XRD menampilkan dua puncak landai pada sudut $2\theta=23^\circ$ dan $2\theta=43^\circ$, mengkonfirmasi bahwa sampel memiliki sifat amorf yang normal untuk karbon aktif berbahan asal biomassa. Selain itu, spektrum FTIR menunjukkan adanya pergeseran pada gugus fungsi dan struktur rantai karbon yang mengindikasikan adanya penguapan bahan organik meliputi selulosa, hemiselulosa dan lignin pada sampel karbon monolit. Sifat elektrokimia elektroda karbon dievaluasi menggunakan metode CV berdasarkan sistem dua elektroda. Kapasitansi spesifik yang dihasilkan adalah sebesar 155 F/g. Hasil yang didapatkan ini lebih tinggi dari penelitian sebelumnya yang juga memanfaatkan limbah ampas wortel sebagai karbon aktif untuk elektroda superkapasitor. Berdasarkan hasil ini maka dapat disimpulkan bahwa ampas jus wortel berpotensi dijadikan sebagai bahan dasar karbon aktif untuk elektroda superkapasitor melalui aktivasi kimia menggunakan KOH dan proses pirolisis satu tahap terintegrasi.

Referensi

Abioye, A.M., Ani, F.N., 2015. Recent development in the production of activated carbon electrodes from agricultural waste biomass for supercapacitors: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 52, 1282–1293.

- Agustino, Awitdrus, Farma, R., Taer, E., 2020. Pembuatan dan Karakterisasi Elektroda Karbon Aktif dari Serat Daun Nanas untuk Aplikasi Superkapasitor. *J. Aceh Phys. Soc.* 9, 1–8.
- Ahmed, S., Ahmed, A., Rafat, M., 2018. Supercapacitor performance of activated carbon derived from rotten carrot in aqueous, organic and ionic liquid based electrolytes. *J. Saudi Chem. Soc.* 22, 993–1002.
- Bhattacharjya, D., Yu, J.S., 2014. Activated carbon made from cow dung as electrode material for electrochemical double layer capacitor. *J. Power Sources* 262, 224–231.
- Changmai, M., Banerjee, P., Nahar, K., Purkait, M.K., 2018. A novel adsorbent from carrot, tomato and polyethylene terephthalate waste as a potential adsorbent for Co (II) from aqueous solution: Kinetic and equilibrium studies. *J. Environ. Chem. Eng.* 6, 246–257.
- Deng, J., Xiong, T., Wang, H., Zheng, A., Wang, Y., 2016. Effects of cellulose, hemicellulose, and lignin on the structure and morphology of porous carbons. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 4, 3750–3756.
- Deraman, M., Daik, R., Soltaninejad, S., Nor, N.S.M., Awitdrus, Farma, R., Mamat, N.F., Basri, N.H., Othman, M.A.R., 2015. A New Empirical Equation for Estimating Specific Surface Area of Supercapacitor Carbon Electrode from X-Ray Diffraction. *Adv. Mater. Res.* 1108, 1–7.
- Erabee, I.K., Ahsan, A., Zularisam, A.W., Idrus, S., Daud, N.N.N., Arunkumar, T., Sathiyamurthy, R., Al-Rawajfeh, A.E., 2017. A new activated carbon prepared from sago palm bark through physiochemical activated process with zinc chloride. *Eng. J.* 21, 1–14.
- Foo, K.Y., Hameed, B.H., 2012. Potential of jackfruit peel as precursor for activated carbon prepared by microwave induced NaOH activation. *Bioresour. Technol.* 112, 143–150.
- González-García, P., 2018. Activated carbon from lignocellulosics precursors: A review of the synthesis methods, characterization techniques and applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82, 1393–1414.
- Kumar, K., Saxena, R.K., Kothari, R., Suri, D.K., Kaushik, N.K., Bohra, J.N., 1997. Correlation between adsorption and x-ray diffraction studies on viscose rayon based activated carbon cloth. *Carbon N. Y.* 35, 1842–1844.
- Ma, F., Ding, S., Ren, H., Liu, Y., 2019. Sakura-based activated carbon preparation and its performance in supercapacitor applications. *RSC Adv.* 9, 2474–2483.
- Mensah-Darkwa, K., Zequine, C., Kahol, P.K., Gupta, R.K., 2019. Supercapacitor energy storage device using biowastes: A sustainable approach to green energy. *Sustain.* 11.
- Ong, L.K., Kurniawan, A., Suwandi, A.C., Lin, C.X., Zhao, X.S., Ismadji, S., 2012. A facile and green preparation of durian shell-derived carbon electrodes for electrochemical double-layer capacitors. *Prog. Nat. Sci. Mater. Int.* 22, 624–630.
- Pandolfo, A.G., Hollenkamp, A.F., 2006. Carbon properties and their role in supercapacitors. *J. Power Sources* 157, 11–27.
- Poonam, Sharma, K., Arora, A., Tripathi, S.K., 2019. Review of supercapacitors: Materials and devices. *J. Energy Storage* 21, 801–825.
- Rangabhashiyam, S., Balasubramanian, P., 2019. The potential of lignocellulosic biomass precursors for biochar production: Performance, mechanism and wastewater application-A review. *Ind. Crops Prod.* 128, 405–423.
- Scott, K., 2016. *Electrochemical principles and characterization of bioelectrochemical systems, Microbial electrochemical and fuel cells.* Elsevier Ltd.
- Song, M., Jin, B., Xiao, R., Yang, L., Wu, Y., Zhong, Z., Huang, Y., 2013. The comparison of two activation techniques to prepare activated carbon from corn cob. *Biomass and Bioenergy* 48, 250–256.
- Taer, E., Apriwandi, A., Yusriwandi, Y., Mustika, W.S., Zulkifli, Z., Taslim, R., Sugianto, S., Kurniasih, B., Agustino, A., Dewi, P., 2018a. *Comparative study of CO₂ and H₂O activation in the synthesis of carbon electrode for supercapacitors.* AIP Conf. Proc. 1927, 030036–1–030036–6.
- Taer, E., Dewi, P., Taslim, R., Purnama1, A., Apriwandi, Agustino, Setiadi, R.N., 2018b. *The Synthesis of Carbon Electrode Supercapacitor from Durian Shell Based on Variations in the Activation Time.* AIP Conf. Proc. 1927, 030026–1–030026–6.
- Taer, E., Natalia, K., Apriwandi, A., Taslim, R., Agustino, A., Farma, R., 2020. The synthesis of activated carbon nano fiber electrode made from acacia leaves (*Acacia mangium* wild) as supercapacitors. *Adv. Nat. Sci. Nanosci. Nanotechnol.* 11, 25007.
- Wei, X., Wei, J.S., Li, Y., Zou, H., 2019. Robust hierarchically interconnected porous carbons derived from discarded *Rhus typhina* fruits for ultrahigh capacitive performance supercapacitors. *J. Power Sources* 414, 13–23.
- Xia, X., Liu, H., Shi, L., He, Y., 2012. Tobacco stem-based activated carbons for high performance supercapacitors. *J. Mater. Eng. Perform.* 21, 1956–1961.
- Yang, S., Wang, S., Liu, X., Li, L., 2019. Biomass derived interconnected hierarchical micro-meso-macro- porous carbon with ultrahigh capacitance for supercapacitors. *Carbon N. Y.* 147, 540–549.
- Yang, V., Senthil, R.A., Pan, J., Khan, A., Osman, S., Wang, L., Jiang, W., Sun, Y., 2019. Highly ordered hierarchical porous carbon derived from biomass waste mangosteen peel as superior cathode material for high performance supercapacitor. *J. Electroanal. Chem.* 113616.
- Zhang, W.L., Xu, J.H., Hou, D.X., Yin, J., Liu, D.B., He, Y.P., Lin, H.B., 2018. Hierarchical porous carbon prepared from biomass through a facile method for supercapacitor applications. *J. Colloid Interface Sci.* 530, 338–344.
- Zhang, Y., Yu, S., Lou, G., Shen, Y., Chen, H., Shen, Z., Zhao, S., Zhang, J., Chai, S., Zou, Q., 2017. Review of macroporous materials as electrochemical supercapacitor electrodes. *J. Mater. Sci.* 52, 11201–11228.